第 40 卷　第 2 期
2022 年 6 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40,　No. 2
June., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.02.05

星系结构成分分解星表的比较以及对低表面亮度星系选取的影响

沈梦婷[1,2]，尹　君[2]，郝　蕾[2]，卢家风[2]，蒋青权[1]，李　静[1]

(1. 西华师范大学，南充 637000；　2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030)

摘要： 星系面亮度轮廓的成分分解有助于理解星系的形成与演化。已有若干个基于大样本星系图像给出的星系结构成分分解星表，它们在星系结构的统计性质研究上具有重要意义，但由于个体拟合结果相差较大，当选取低表面亮度星系 (low surface brightness galaxies, LSBG) 进行小样本研究时，会导致较大偏差，因此，研究这些星表结果的异同十分必要。基于 Meert 等人 (M16 星表) 和 Domínguez 等人 (MPP-VAC 星表) 发布的星系成分分解星表，对两个星表在单成分拟合及两成分分解的结果进行了比较，得到主要结论如下：对于单成分拟合样本，两个星表各拟合参数的结果比较接近。而对两成分拟合结果进行比较后发现，在早型星系中，除了 Sérsic 指数，两个星表核球成分拟合结果的一致性略好于盘成分，核球与盘成分的半光半径、面亮度和视星等的平均弥散比分别为 0.83, 0.94 和 0.52；在晚型星系中，两个星表盘成分拟合结果的一致性要显著好于核球成分，核球和盘成分的半光半径、Sérsic 指数、面亮度和视星等的平均弥散比分别为 4.9, 3, 3 和 4。而造成两个星表两成分拟合结果差异的主要原因是 MPP-VAC 星表对因中心像素太亮而影响拟合的星系在拟合时限制了 Sérsic 指数 n 的取值范围，使所得成分分解的结果更为合理。依据 LSBG 的定义，发现晚型星系中 LSBG 候选体占 12%，其中只有 1/4 的星系被两个星表共同认定为 LSBG，而由于拟合结果差异使得剩余 3/4 的星系仅被一个星表判定为 LSBG。

关　键　词： 星系结构；成分分解；结构参数

中图分类号： P152　　　**文献标识码：** A

收稿日期： 2022-02-21；　**修回日期：** 2022-04-01

资助项目： 上海市自然科学基金 (22ZR1473000)；国家自然科学基金 (U1831205)；四川省青年科技创新团队 (21CXTD0038)；西华师范大学创新团队基金 (KCXTD2022-6)；中央引导地方科技发展资金项目 (2021ZYD0032)

通讯作者： 尹君，jyin@shao.ac.cn

1 引　言

星系的复杂结构是星系经历各种物理过程 (如气体吸积、恒星形成、盘的形成、生长和翘曲、棒的形成和翘曲等) 时逐渐形成的[1]。星系在不同的演化阶段会经历不同的物理过程，进而形成不同的星系结构，因此，星系不同结构成分的分解及研究对理解星系的形成和演化具有重要意义。例如，星系核球的大小和特性可以鉴别星系核球是经典核球还是伪核球，进而推断星系演化经历过主并合，并以缓慢演化为主[2]；又如，从 ΛCDM 的 N 体模型[3] 和核球的长期演化模型[4] 中，人们发现核球和盘成分的恒星质量可以对星系合并树进行限制。

对星系结构成分分解通常需要使用星系图像数据。SDSS 数字巡天第 7 次数据释放 (DR7) 提供了数亿天体的测光观测以及 100 多万天体的光谱观测，其中测光及光谱观测均认证为星系，尘埃消光改正后 Petrosian r 波段星等在 14 ~ 17.77 mag 之间的天体有近 70 万个。有许多工作基于该星系样本进行了面亮度拟合以及分解。NASA Sloan Atlas 星表[5] (以下简称 NSA) 利用椭圆彼得罗森孔径测光法得到星系的径向面亮度轮廓后，用单一成分拟合了该轮廓，得到了星系星等、大小和椭率等基本参数。2011 年，Simard 等人[6] (以下简称 S11)通过 Source Extractor [7] (以下简称 SExtractor) 和 GIM2D 软件包[8]，得到了 SDSS DR7 星系面亮度轮廓的单一成分拟合和两成分 (核球+盘) 分解的星表。2016 年，Meert 等人[9] (以下简称 M16)，使用 SExtractor 和 GALFIT[10] 软件包，也对 SDSS DR7 的 67 万个星系进行了单一成分面亮度轮廓拟合和两成分 (核球+盘) 面亮度分解，得到了 M16 星表。Domínguez Sánchez 等人[11] 2021 年基于 Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory (APO) (简称 MaNGA) DR17 数据给出了 MaNGA PYMORPH 测光增值星表 (以下简称 MPP-VAC)，共有 10 293 个星系，它同样使用 SExtractor 和 GALFIT 软件包，并得到单一成分面亮度轮廓拟合和两成分 (核球+盘) 面亮度分解的结果。

利用大样本优势，这些工作对星系的结构成分给出很好的描述。基于 MPP-VAC 星表，Fischer 等人[12] 分析形态参数后发现，核球成分 Sérsic 指数 n 在早型星系中具有较宽分布，中位值约为 4，而晚型星系的核球成分在 $n = 1$ 附近达到峰值；Kim 等人[13] 发现大部分星系核球成分的颜色都是红色，与核球大小无关；Catalán 等人[14] 利用积分视场光谱数据发现，核球成分的比恒星形成率 (specific star formation rate, sSFR) 淬灭发生在恒星质量为 $10^{9.5}M_\odot$ 时，而盘成分的 sSFR 在恒星质量为 $10^{10.5}M_\odot$ 时发生淬灭，并且发现在中、高密度的环境中，核球和盘成分的恒星形成率都会降低。

这些结果虽然在大样本统计上有重要意义，但由于成分分解方法中固有的参数简并等问题，当单独研究一些个源，或某些特殊类型星系的小样本时，这些星表对同一个源可以给出非常不同的成分分解结果。对某些科学应用而言，这样的差别可能有重要的影响。例如，对低表面亮度星系 (low surface brightness galaxies, LSBG) 的研究依赖一个可靠的低表面亮度的星系样本。LSBG 是以盘成分的中心面亮度 $\mu_{0,\rm disk}$ 来定义的星系，通常人们使用 $\mu_{0,\rm disk} > 22.5$ mag·arcsec^{-2} 为分类标准[15]，但也有人使用 23 mag·arcsec^{-2} 做 LSBG 选择的临界值[16]。因此，准确地分解并扣除星系中的核球成分，对 LSBG 样本的合理选择至关重

要。如果希望使用上述成分分解星表来选择 LSBG，那么理解这些星系在 LSBG 中的差别就很必要。

上文提到的四个星表，包括 NSA, S11, M16 和 MPP-VAC 星表，其样本数量及方法如表 1 所示。NSA 星表只有单一成分的拟合结果，未进行两成分分解，因此本文不对该星表进行讨论。S11 星表与 M16 星表在样本数量上相当，但采用了不同的成分分解软件包；由于 S11 星表在拟合过程中高估了天光背景，导致星系的亮度整体被低估[17]，因此本文亦不做讨论。M16 星表与 MPP-VAC 星表的样本数量虽然相差甚多，但都采用了相同的成分分解方法，且均进行了单一成分拟合以及两成分 (核球+盘) 分解。因此，本文选择 M16 星表和 MPP-VAC 星表进行展开讨论，详细比较这两个星表在 g 波段的单一成分拟合和两成分 (核球+盘) 分解方法中所得星系结构参数的异同以及对低表面亮度星系选取的影响。

表 1 成分分解星表

星表	星系数量	分解方法	分解结果
NSA	641 409	椭圆彼得罗森孔径测光法	单成分分解
S11	671 425	SExtractor 和 GIM2D 软件包	单成分、两成分 (核球+盘) 分解
M16	670 722	SExtractor 和 GALFIT	单成分、两成分 (核球+盘) 分解
MPP-VAC	10 293	SExtractor 和 GALFIT	单成分、两成分 (核球+盘) 分解

文章的结构如下：第 2 章详细介绍了成分分解的方法，以及两个星表的数据来源和拟合方法；第 3 章展示了不同形态类型星系的单一成分拟合和两成分 (核球+盘) 分解的结果差异，进一步比较了单成分和两成分 Sérsic 指数的一致性；第 4 章基于 M16 星表和 MPP-VAC 星表的成分分解结果，比较盘成分的中心面亮度以及使用两个星表选取 LSBG 样本的区别；最后，第 5 章进行简单的总结与展望。

2 成分分解方法及星表介绍

2.1 径向面亮度轮廓的常用描述函数

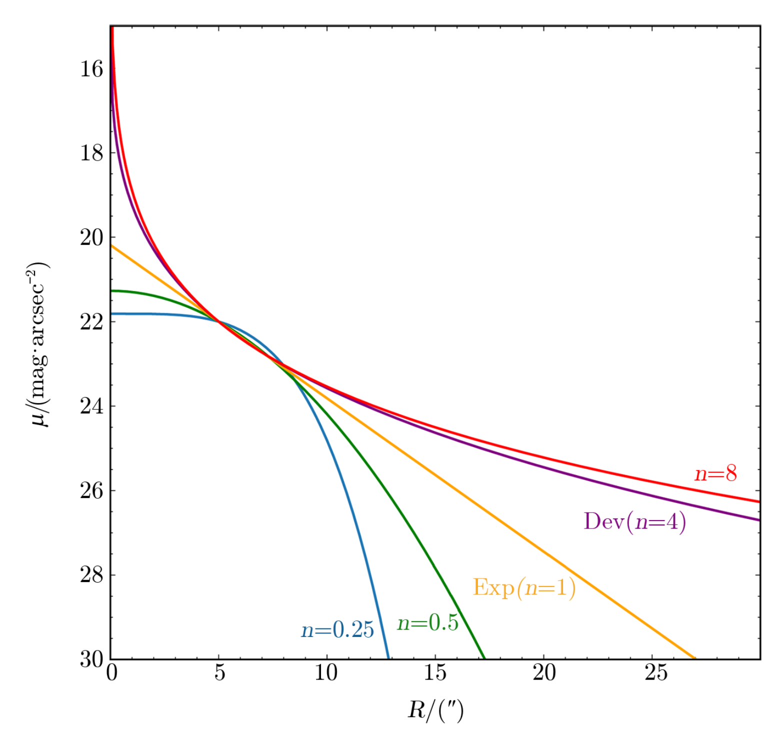
径向面亮度轮廓表征了星系面亮度从星系中心随星系半径的径向变化。在星系结构成分的分析工作中，通常采用以下几种径向分布函数进行描述。

(1) Sérsic 函数[18]。用于描述星系面亮度轮廓最常用的函数之一，一般用于核球成分的拟合，具有以下函数形式：

$$I(r) = I_{\rm e}\exp\left(-b_{\rm n}\left[\left(\frac{r}{R_{\rm e}}\right)^{1/n} - 1\right]\right) \quad . \tag{1}$$

其中，$R_{\rm e}$ 被称为半光半径，在 $R_{\rm e}$ 内包含了一半的星系总流量；$I_{\rm e}$ 是在半光半径 $R_{\rm e}$ 处的面亮度；$b_{\rm n} = 1.9992\,n - 0.3271$，其中 Sérsic 指数 n 通常被称为聚度参数，当 n 较大时，它具有陡峭的内部轮廓和高度延伸的外翼；相反，当 n 较小时，内部轮廓变平且较大半径处

陡然截断。图 1 展示了 Sérsic 函数随着 n 值的变化，由图可见，n 越大，则内部轮廓越陡，外部轮廓越延展。



注：图中的 Sérsic 轮廓是当 R_e =5″ 和 $\mu_e = 22$ mag·arcsec^{-2} 时，Sérsic 函数随指数 n 的变化。

图 1 Sérsic 函数随指数 n 的变化

(2) de Vacouleurs 函数[19]。多用于描述早型星系或星系的核球成分，是在 Sérsic 函数中 Sérsic 指数 $n = 4$ (即 $b_n = 7.669$) 的特例。

(3) e 指数函数。多用于描述星系盘成分的面亮度轮廓，是 Sérsic 指数 $n = 1$ 时 Sérsic 函数的特例，其函数形式如下：

$$I_{Exp}(r) = I_{0,d}\exp\left(-\frac{r}{R_d}\right) \quad . \tag{2}$$

其中，$I_{0,d}$ 是盘的中心面亮度；R_d 被称为盘的标长，为面亮度下降至中心面亮度 $1/e$ 处的半径。当 Sérsic 指数 $n = 1$ 时，R_e 和 R_d 之间存在关系：$R_e = 1.678R_d$。

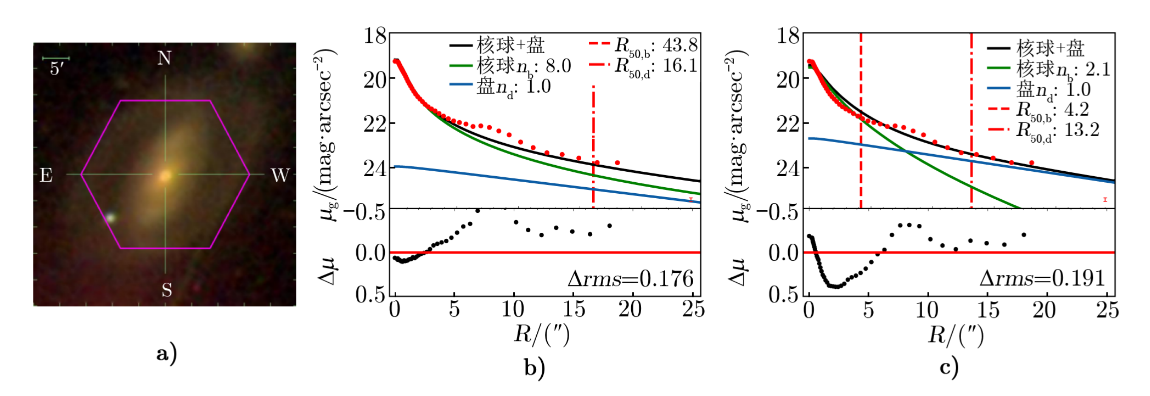
2.2 M16 星表的成分分解方法

Meert 等人[9]从 SDSS DR7 中筛选了 670 723 个星系 ($14 \leqslant m_{r,cor} \leqslant 17.77$ mag) 进行面亮度轮廓分析，在改正点扩展函数 (point spread function, PSF) 后，得到了四种成分分解拟合结果。其中，两种为单成分拟合，分别由 de Vacouleurs 函数和 Sérsic 函数描述；两种为两成分 (核球+盘) 拟合，由 de Vacouleurs 函数 + e 指数函数组合 (简称 DevExp) 和 Sérsic 函数 + e 指数函数组合 (简称 SerExp) 来描述，其中 Sérsic 函数拟合时限制了指数 n 的上限

为 8，e 指数函数通过限定 Sérsic 指数 $n = 1$ 实现，并不指定两个函数分别描述哪个成分。

借助 PYMORPH 分析法，M16 星表对 SDSS DR7 的 g, r, i 三个波段的图像均进行了分析，得到了每个波段各自的成分分解结果及结构参数。PYMORPH 分析法是一个基于 Python 的自动化软件，调用 SExtractor[7] 和 GALFIT[10] 来计算星系的结构参数[20]，具体实现过程如下：将星系原始图像输入 PYMORPH，PYMORPH先使用 SExtractor 对星系原始图像定义一个遮盖星系外部区域的掩模图像，从中提取出星系图像；同时对星系图像进行初步分析，得到星系的中心位置、视星等等参数的预估值；然后将这些预估参数连同星系图像和 PSF 图像 (不同的星系 SDSS 会提供其特定的 PSF 值，而 g, r, i 三个波段平均 PSF 的半峰全宽分别为 1.47″, 1.35″ 和 1.28″[9]) 一同传递给 GALFIT 进行详细拟合。GALFIT 利用指定的径向面亮度轮廓函数对 PSF 图像进行卷积后再与观测图像进行比对，最终得到单一成分拟合或两成分拟合的结构参数。

图 2 a) 以 MaNGA 星系 11952-12701 为例，图 2 b) 展示了 M16 星表所得的 SerExp 两成分面亮度拟合结果。M16 星表拟合的该星系核球成分 Sérsic 指数 $n_{\rm b}$ 为 8，半光半径 $R_{\rm e,b} = 43.8''$，具有较明亮的核球成分；盘成分的 Sérsic 指数 $n_{\rm d}$ 为 1，半光半径 $R_{\rm e,d} = 16.1''$，中心面亮度 $\mu_{0,\rm d}$ 约为 23.9 mag·arcsec^{-2}；真实面亮度 (红点) 减去总面亮度 (核球成分+盘成分) 拟合曲线 (黑线) 的 Δrms (即 $\Delta rms = \sqrt{\Sigma(\mu_{\rm data} - \mu_{\rm model})^2/n}$) 为 0.176。



注：a) 为星系 11952-12701 的 SDSS 测光图像。b) 为 M16 星表中给出的 SerExp 两成分面亮度拟合结果，上图中，红色的点是星系椭圆等光度测光所得的 g 波段面亮度轮廓，黑色实线是核球+盘成分的总面亮度拟合结果，绿色实线和蓝色实线分别代表核球成分和盘成分的面亮度分解结果，红色虚线和红色点划线分别表示了核球成分和盘成分的半光半径，在图例中分别显示了各拟合参数的数值，并在每幅图的右下角显示了真实数据点 (红点) 中最大的测光误差；下图中，黑色的圆点显示了实测面亮度 (红点) 减去总面亮度拟合曲线 (黑线) 的残差 $\Delta\mu_{\rm g}$ 分布，红色实线表征拟合结果与真实数据一致，在右下角显示 Δrms ($\Delta rms = \sqrt{\Sigma(\mu_{\rm data} - \mu_{\rm model})^2/n}$) 的值。c) 为 MPP-VAC 星表的拟合结果，图中点与线的含义与中间 M16 星表的拟合结果一致。

图 2 星系 11952-12701 在 M16 和 MPP-VAC 星表中的两成分分解结果

2.3　MPP-VAC 星表的成分分解法

MPP-VAC 星表[11]基于 SDSS DR15 图像对 MaNGA DR17 中的 10 293 个星系进行成分分解，给出了 Sérsic 单成分拟合和 SerExp 两成分拟合的结果。MPP-VAC 星表也利用 PYMORPH 分析方法分别对 SDSS DR15 的 g, r, i 波段图像进行成分分解，其 g, r, i 三个波段 PSF 的平均半峰全宽分别为 1.44″, 1.32″, 1.26″。

图 2 c) 展示了星系 11952-12701 在 MPP-VAC 星表中的拟合结果。在 MPP-VAC 星表中，星系 11952-12701 的核球成分是由 Sérsic 指数较小的 Sérsic 函数 ($n_\mathrm{b} = 2.1$) 拟合的，而盘成分是由 e 指数函数拟合的，两成分的半光半径分别为 4.2″ 和 13.2″。盘成分的中心面亮度 $\mu_{0,\mathrm{d}}$ 约为 22.5 mag·arcsec^{-2}，与 M16 星表的拟合结果相比，其具有较小的核球和较亮的盘成分，而拟合残差 Δrms 为 0.191，与 M16 星表的残差相近。

MPP-VAC 星表在进行 SerExp 两成分拟合时，Sérsic 函数限定指数 n 的变化范围为 $0 \sim 8$，e 指数函数采用 Sérsic 指数 ($n = 1$) 进行拟合，拟合时不指定各函数描述的是核球还是盘成分。在拟合过程中，一些星系受星系中心过亮像素影响，Sérsic 函数的指数 n 接近允许的上限值 8。该 Sérsic 函数面亮度轮廓可延伸至外围很远处 (见图 2 的红线)，导致星系在明显可辨认的盘区域出现核球成分仍占主导的不合理拟合结果。因此，MPP-VAC 星表对这类星系重新运行 PYMORPH，将 Sérsic 指数 n 的上限降为 3。如果拟合仍然受限于中心像素，而星系盘区域出现明显不合理的拟合结果，n 的上限将进一步减小到 2，甚至至 1，最终迫使核球成分仅在内部区域占主导。也就是说，MPP-VAC 星表中部分星系会出现核球成分由 e 指数函数描述，而盘成分由 Sérsic 指数 $n < 1$ 的 Sérsic 函数描述的情况。通过比较原始拟合结果和重新拟合结果与真实数据点之间的 χ^2，若重新拟合的结果较好，则 MPP-VAC 星表将保留重新拟合的结果[12]。

3　星表结果比较

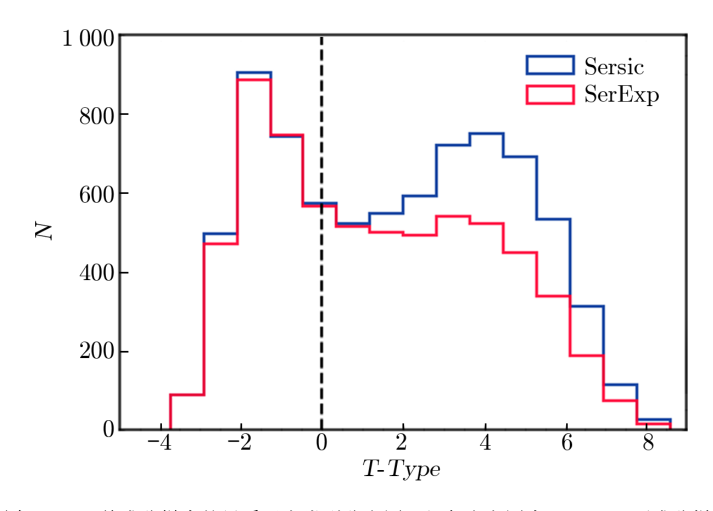
上一章中我们分别详细介绍了 M16 和 MPP-VAC 星表的成分分解方法。M16 星表中有 67 万多个样本星系，MPP-VAC 星表有 10 293 个样本星系，它们之间有大约 8 500 个共同星系。M16 和 MPP-VAC 两个星表虽然都是采用 PYMORPH 分析方法进行拟合，但是 M16 星表 g 波段 PSF 平均的半峰全宽为 1.47″，而 MPP-VAC 星表采用的 g 波段 PSF 平均的半峰全宽为 1.44″，并且 MPP-VAC 星表对受中心过亮像素影响的星系在限定了 Sérsic 函数的指数 n 后重新进行了拟合 (详见 2.3 节介绍)。因此，M16 与 MPP-VAC 星表的成分分解结果有所不同。

为了展示两个星表成分分解结果异同，本文仅选择 g 波段成分分解的结果进行对比，i 和 r 波段拟合结果的比较与 g 波段相似，不做赘述。鉴于 M16 和 MPP-VAC 星表都采用了 Sérsic 单成分拟合和 SerExp 两成分拟合的方法，因此我们对这两个方法分别进行了样本匹配。匹配时，我们去掉那些拟合失败的星系(即 Sérsic 单成分样本去掉 Sérsic 指数 $n = -999$ 的星系，SerExp 两成分样本去掉两个成分的中心面亮度 $\mu_0 < 10$ mag·arcsec^{-2}

和 $\mu_0 > 30$ mag·arcsec^{-2} 的星系)，并仅选用 MPP-VAC 星表中数据质量较好的主样本，最终匹配得到两个样本：Sérsic 单成分拟合结果样本，包括 7 613 个星系；SerExp 两成分拟合结果样本，包括 6 394 个星系，如表 2 所示。此外，我们还从 MPA-JHU 星表[21]中匹配得到每个星系的恒星质量 (M_*)，与 MDLM-VAC 星表[11]进行匹配并得到每个星系的形态类型 (T-$Type$)，对所得两个样本进行了参数补充。两个样本的形态类型 (T-$Type$) 分布见图 3。

表 2　M16 和 MPP-VAC 星表采用的成分分解方法及样本匹配

	de Vacouleurs	Sérsic	DevExp	SerExp
M16	670 722	670 722	670 722	670 722
MPP-VAC		10 293		10 293
共同星系		7 613		6 394



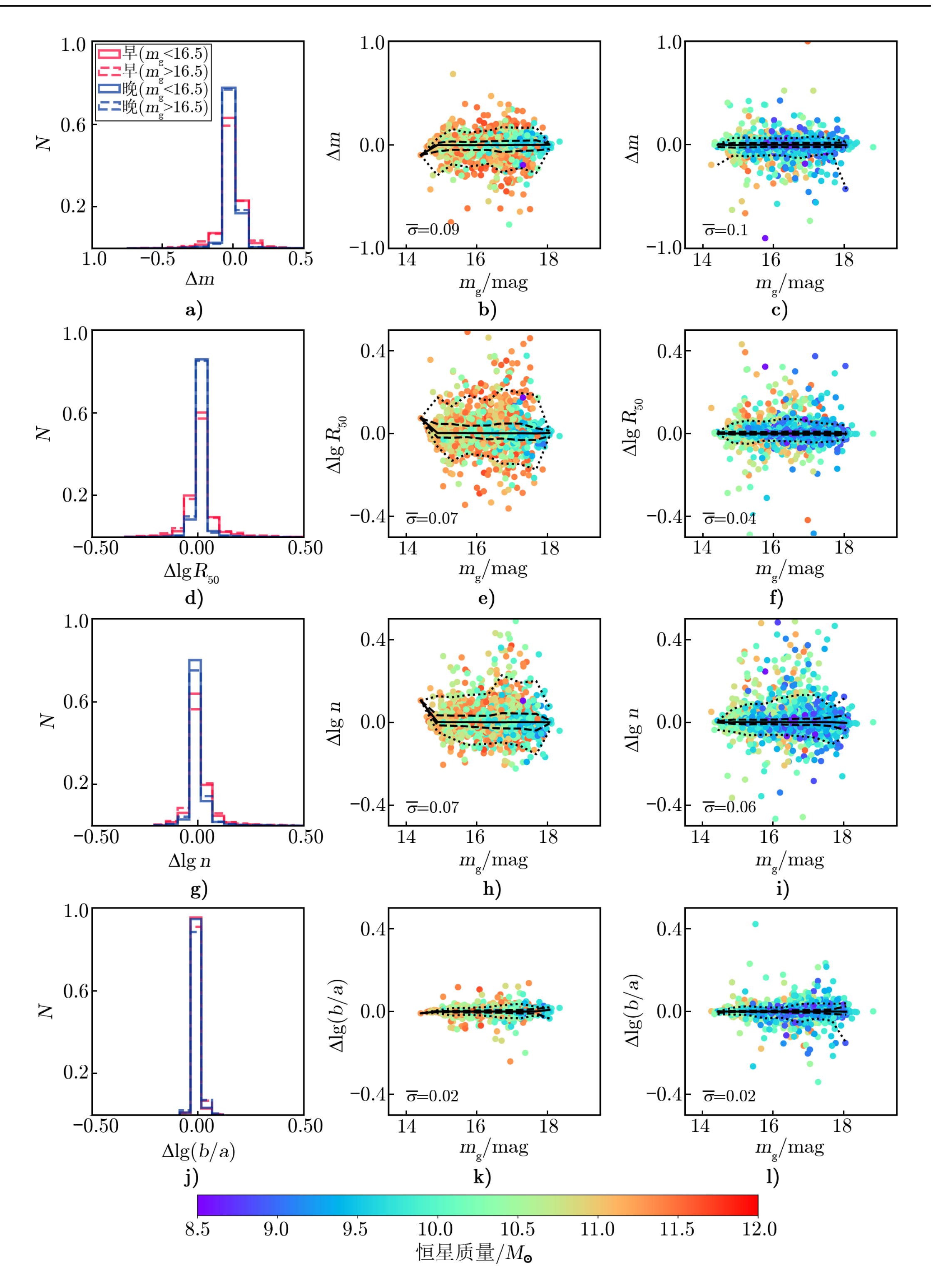
注：蓝色直方图为 Sérsic 单成分样本的星系形态类型分布图，红色直方图为 SerExp 两成分样本的星系形态类型分布图，黑色虚线是早、晚型星系的分界线 (T-$Type$=0)。

图 3　星系形态类型 (T-$Type$) 分布

3.1　Sérsic 单成分拟合样本

Sérsic 单成分拟合样本包含 7 613 个星系。为了更深入地理解两个星表的拟合差异，我们根据 MDLM-VAC 星表[11]提供的形态分类指标 (T-$Type$)，将样本再分成早型星系子样本 (T-$Type < 0$，共 2 548 个星系) 和晚型星系子样本 (T-$Type > 0$，共 5 065 个星系)。

我们对两个星表单成分的拟合结果进行了一致性比较。图 4 显示了 M16 星表与 MPP-VAC 星表 Sérsic 单成分拟合参数的比较结果，第一列是早、晚型星系在不同视星等范围内，各参数一致性比较的归一化直方图；第二、三列分别为早、晚型星系各参数一致性与视星等的关系，图中从上到下四行分别展示了两星表 Sérsic 拟合的视星等 (Δm)、半光半径 ($\Delta \lg R_{50}$)、Sérsic 指数 ($\Delta \lg n$) 与轴比 ($\Delta \lg(b/a)$) 的比较，差值均为 M16 星表减去 MPP-VAC 星表。



注：黑色实线表示各参数的中位值，黑色虚线和点线分别是 1σ 和 2σ 所在位置，在每幅图的左下角显示它们的平均弥散，图中的颜色表征了星系的恒星质量。

图 4　M16 和 MPP-VAC 星表对不同形态类型星系的 Sérsic 单成分拟合结果比较

在图 4 第一列的各参数比较的直方图中，我们除了区分早、晚型星系外，还以视星等 16.5 mag 为分界线对样本进行了划分，以研究信噪比对拟合结果的可能影响。从图 4 a)—j) 可见，直方图并不对称，也就是说两个样本的视星等 m 和半光半径 R_{50} 存在系统性差别，M16 星表的视星等比 MPP-VAC 星表的偏暗、R_{50} 偏小，且这种系统性差别在早型星系 (红色直方图) 中更明显，并与星系的视星等无关。而图 4 g)—j) 中，两样本的 Sérsic 指数 $\Delta\lg n$ 和轴比 $\Delta\lg(b/a)$ 的分布比较对称，意味着两个样本的拟合结果比较一致，没有系统性偏差，只是早型星系 (红色) 的弥散比晚型星系 (蓝色) 略大，且在较暗星系中 (虚线) 拟合结果的一致性没有较亮星系 (实线) 中好，直方图的分布更宽。

通过对比早、晚型星系在两个星表中各拟合参数的一致性 (图 4 的第二、三列)发现，无论对于早型还是晚型星系，两个星表拟合的视星等、Sérsic 指数和轴比都很接近，且不受星系质量影响 (由颜色标示)。由图 4 e) 可知，早型星系半光半径的差值 ($\Delta\lg R_{50}$) 的弥散略大，其平均弥散为 0.07。总的来说，在早、晚型星系中两个星表单成分拟合结果的弥散都较小，拟合参数都比较接近。

3.2 SerExp 两成分拟合样本

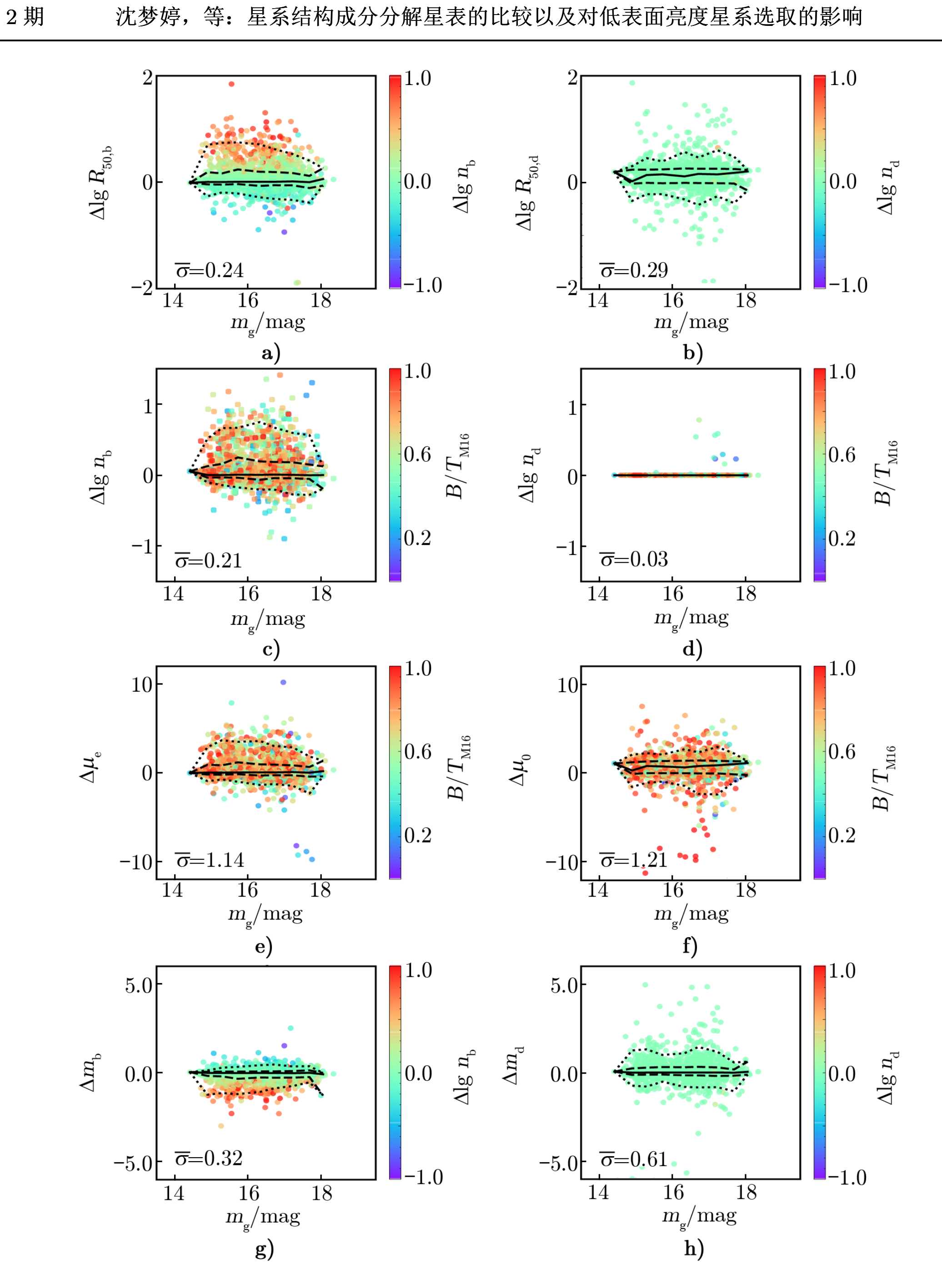
盘成分的分解结果将会影响低表面亮度星系的样本选择，正如图 2 所示，星系 11952-12701 在 M16 和 MPP-VAC 两个星表中盘成分的中心面亮度相差约 1.5 mag·arcsec^{-2}。因此，比较和研究不同星表两成分(核球+盘) 分解结果的异同具有重要指导意义。我们依然根据形态分类指标 (T-$Type$) 将样本分成早型星系 (T-$Type < 0$，共 2 502 个星系) 和晚型星系 (T-$Type > 0$，共 3 892 个星系)，然后分别展开讨论。

3.2.1 早型星系的两成分拟合

早型星系 (T-$Type < 0$) 包含了椭圆星系 (E) 和透镜星系 (S0)。图 5 展示了早型星系在 SerExp 两成分拟合中 M16 星表与 MPP-VAC 星表结果的比较，纵坐标差值均为 M16 星表结果减去 MPP-VAC 星表各参数的结果，第一列为核球成分，第二列为盘成分。

与核球成分相比，两个星表盘成分半光半径 $R_{50,\mathrm{d}}$ 拟合值的差异略大 (如图 5 a) 和 b) 所示)。此外，对核球成分而言 (见图 5 a))，$\Delta\lg R_{50,\mathrm{b}}$ 与 $\Delta\lg n_{\mathrm{b}}$ 相关，体现在 M16 星表 $R_{50,\mathrm{b}}$ 拟合值比 MPP-VAC 星表大的星系，其 Sérsic 指数 n_{b} 拟合值也偏大 (颜色红)，反之亦然；位于 $\Delta\lg R_{50,\mathrm{b}} = 0$ 线上的星系，是两个星表中核球 $R_{50,\mathrm{b}}$ 拟合一致的点，其中 Sérsic 指数 n_{b} 也一致的星系占比约 56%。此外，我们可以看到 $\pm1\sigma$ (虚线)、$\pm2\sigma$ (点线) 的包络线上下并不对称，也就是 M16 星表拟合值偏大的星系相对更多，这可能是因为 MPP-VAC 星表对因中心像素过亮的星系在压低 Sérsic 指数n 后进行重新拟合产生的结果。而对于盘成分而言 (见图 5 b))，由于大部分早型星系的盘成分是用 e 指数函数拟合的，而 e 指数拟合限定了 $n_d = 1$，因此 $R_{50,\mathrm{d}}$ 与 n_{d} 不相关。

核球成分的 Sérsic 指数 n_{b} 在两个星表中的差别较大 (见图 5 c)，颜色代表 M16 星表得到的核球成分光度占比)。虽然 Sérsic 指数的差值 ($\Delta\lg n_{\mathrm{b}}$) 的中位值都位于 0 附近，但 $\Delta\lg n_{\mathrm{b}}$ 的平均弥散 ($\bar{\sigma}$) 为 0.21。从 $\pm1\sigma$ 和 $\pm2\sigma$ 包络线可以看出，$\Delta\lg n_{\mathrm{b}}$ 的弥散并不对称，$\Delta\lg n_{\mathrm{b}} > 0$ 的弥散比 $\Delta\lg n_{\mathrm{b}} < 0$ 的大。因此，与 MPP-VAC 星表相比，M16 星表拟合得



注：第一列是核球成分，第二列是盘成分。a), b) 是两个星表拟合得到的半光半径的差值 ($\Delta\lg R_{50}$)，它们的颜色分别表示核球和盘成分 Sérsic 指数 n 的差值；c), d) 是两个星表 Sérsic 指数 n 的差值 ($\Delta\lg n$)，颜色条表征 M16 星表得到的核球成分光度占比；e) 是两个星表核球成分在半光半径处面亮度的差值 ($\Delta\mu_e$)，f) 是两个星表盘中心面亮度差值 ($\Delta\mu_0$)，颜色条也是 M16 星表得到的核球成分光度占比；e), f) 是两个星表视星等拟合结果的差值 (Δm)，颜色条是该成分 Sérsic 指数 n 拟合值的差值 ($\Delta\lg n$)。每幅图黑色实线表示各参数的中位值，黑色虚线和点线分别是 1σ 和 2σ 所在位置，各参数的平均弥散在每幅图的左下角显示。

图 5　M16 星表与 MPP-VAC 星表在早型星系中 SerExp 拟合结果的比较

到的 n_b 偏大的星系更多，这可能也是因为 MPP-VAC 星表限定了 Sérsic 指数 n 的取值范围，使得 MPP-VAC 星表的 Sérsic 指数 n 变小，而 M16 星表的 n_b 变大。盘成分 Sérsic 指数 n_d 的差值 ($\Delta\lg n_d$) 与核球成分相比展现了不一样的特征。从图 5 d) 可见，$\Delta\lg n_d$ 并没有很大的弥散，这是因为大部分早型星系的盘成分在两个星表中均是由 e 指数函数 ($n_d=1$) 来拟合的。但由于 MPP-VAC 星表中核球成分用 e 指数函数拟合、盘成分用指数 $n_d<1$ 的 Sérsic 函数拟合，因此有少量星系的指数差值 $\Delta\lg\ n_d>0$，进而造成盘成分 Sérsic 指数 n_d 存在弥散，但仅为 0.03。

图 5 e) 展示了两星表核球成分在半光半径处面亮度 μ_e 的差值 ($\Delta\mu_e$)，颜色代表 M16 星表得到的核球成分光度占比。我们发现，对核球成分而言，两个星表核球成分在半光半径处的面亮度 μ_e 总体相似，$\Delta\mu_e$ 的中位值为 0。但对盘成分而言，盘中心面亮度μ_0的差值 ($\Delta\mu_0$) 的中位值大约为 0.6 mag·arcsec^{-2} (见图 5 f))，表明 M16 星表得到盘成分中心面亮度相对较暗。两个星表核球成分与盘成分面亮度差值的平均弥散分别为 1.14 和 1.21 mag·arcsec^{-2}，因此，与核球成分 $\Delta\mu_e$ 的弥散相比，盘成分 $\Delta\mu_0$ 的弥散相对较大，且 M16 星表中核球占比大的星系 $\Delta\mu_0$ 的弥散更大，μ_0 的差别甚至可达 10 mag·arcsec^{-2}。

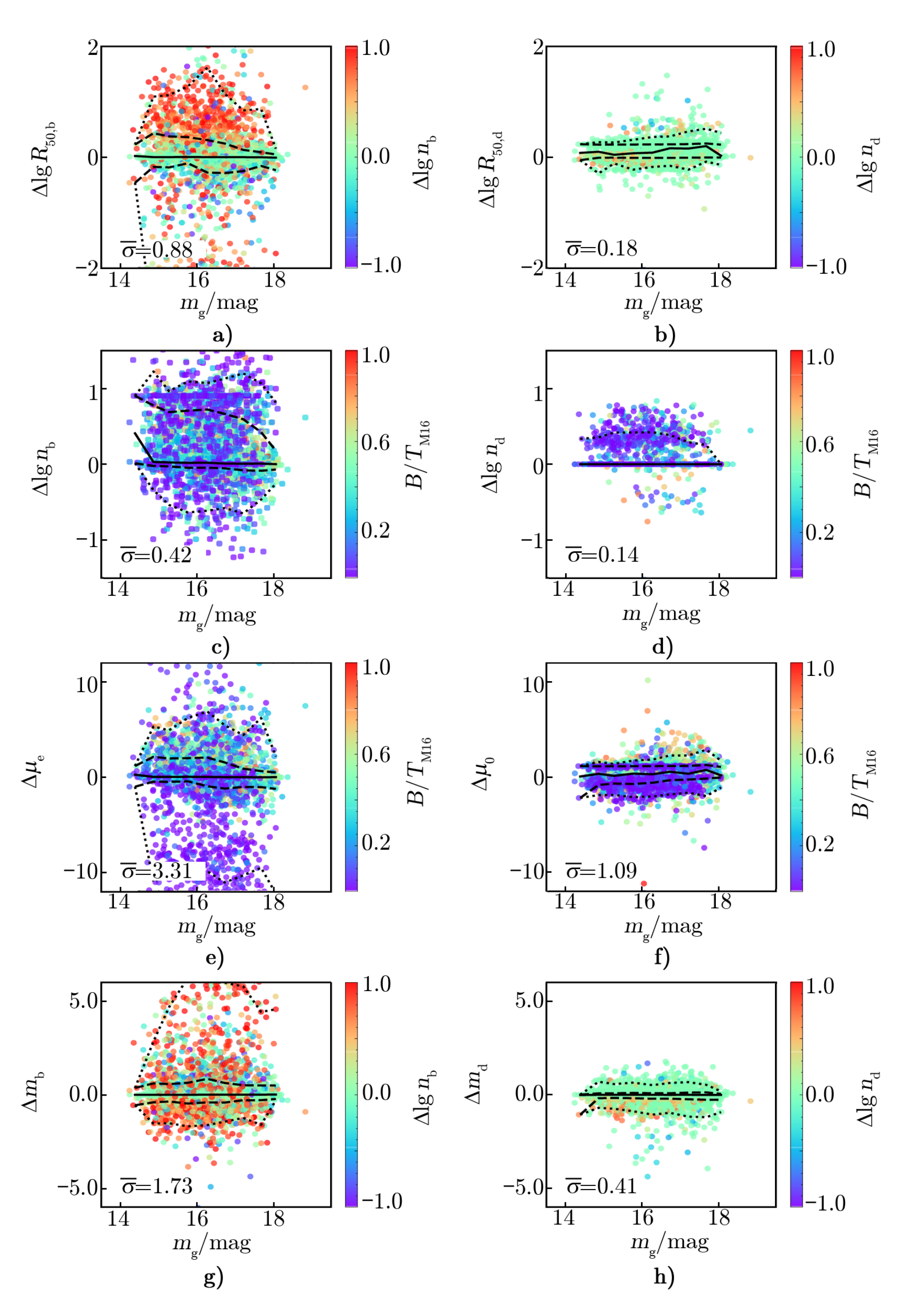
进一步比较两个星表拟合得到的核球成分积分总星等 m_b (图 5 g))，发现两个星表拟合得到的星等值比较接近，其差值 Δm_b 的中位值和平均弥散分别为 0 mag 和 0.32 mag；并且与 Sérsic 指数 n_b 的差异 ($\Delta\lg n_b$) 存在微弱的相关性——M16 星表拟合得到的核球成分 Sérsic 指数 n_b 越大，则核球成分的视星等值越小，即核球越亮。图 5 h) 展示了两个星表拟合得到的盘成分积分总星等 m_d 的差别 (Δm_d)，颜色代表盘成分 Sérsic 指数 n_d 的差异 ($\Delta\lg n_d$)。从图中可以发现，绝大多数星系在两个星表中的盘成分 Sérsic 指数 n_d 较接近，差值为 0 (显示为绿色)，即均由 e 指数函数 ($n=1$) 来拟合的，仅有少量 (0.5%) 星系为非 e 指数盘，但 Δm_d 的平均弥散约为 0.61 mag，比核球成分的弥散大，星等差别甚至可达 5 mag，因此两个星表对早型星系的盘成分描述可能存在较大差别。

综合图 5 可知，除了因大部分星系的盘成分是采用 e 指数函数拟合而导致两个星表 n_d 的拟合结果差异较小外，其他参数的拟合结果表现为早型星系中核球成分拟合结果的一致性略好于盘成分。核球和盘成分的半光半径、面亮度和视星等的平均弥散比分别为 0.83, 0.94 和 0.52，这可能是因为在早型星系中盘成分不存在或比较暗弱。

3.2.2 晚型星系的两成分拟合

晚型星系 (T-$Type>0$) 包含了哈勃分类中类型从 Sa 到 Irr 的星系。对晚型星系在 SerExp 两成分拟合中的 M16 星表与 MPP-VAC 星表结果进行了比较，结果如图 6 所示，纵坐标差值 Δ 均为 M16 星表结果减去 MPP-VAC 星表结果，第一列为核球成分，第二列为盘成分。

我们对 M16 星表与 MPP-VAC 星表的核球成分半光半径 $R_{50,b}$ 拟合值进行了比较 ($\Delta\lg R_{50,b}$)，结果如图 6 a) 所示，图中颜色表征核球 Sérsic 指数 n_b 的差值 ($\Delta\lg n_b$)。由图 6 a) 可知，对大部分星系而言，两个星表核球成分半光半径 $R_{50,b}$ 的拟合结果基本一致，位于 $\Delta\lg R_{50,b}=0$ 附近，这些星系的 Sérsic 指数 n_b 也相同 (绿点)，但 $\Delta\lg R_{50,b}$ 的平均弥散



注：各种颜色的表示意义与图 5 相同，不同之处在于这是晚型星系的拟合结果。

图 6　M16 星表与 MPP-VAC 星表在晚型星系中 SerExp 拟合结果的比较

较大，其值为0.88，且有较多星系在M16星表中的 $R_{50,\mathrm{b}}$ 更大，这可能也是因为MPP-VAC星表对因中心像素过亮影响拟合结果的星系在限定Sérsic指数 n 后进行重新拟合产生的结果。图6 b) 显示了两个星表盘成分半光半径 $R_{50,\mathrm{d}}$ 的差值 $(\Delta\lg R_{50,\mathrm{d}})$，与核球成分的拟合结果相比，$\Delta\lg R_{50,\mathrm{d}}$ 的平均弥散较小，仅为0.18。

与盘成分相比，核球成分Sérsic指数 n_b 在两个星表中具有较大差异 (见图6 c)，颜色代表M16星表的核球成分光度占比)，两个星表拟合得到的核球成分Sérsic指数 n_b 的差值 $\Delta\lg n_\mathrm{b}$ 的平均弥散为0.42。并且从 $\pm1\sigma$ 和 $\pm2\sigma$ 包络线可以看出，$\Delta\lg n_\mathrm{b}$ 的弥散并不对称，较多星系 $\Delta\lg n_\mathrm{b}>0$，即M16星表的 n_b 较大，特别是在 $\Delta\lg n_\mathrm{b}=0.9$ 附近存在聚集。这是由于M16星表Sérsic指数 n 在拟合时的范围设定为 $0\sim8$，部分星系由于星系中心过亮像素的影响使得Sérsic指数 n 的拟合结果为上限值8，而MPP-VAC星表对这些星系在压低了Sérsic指数 n 的拟合上限后重新进行拟合，如果中心像素亮度影响过大，将进一步限制Sérsic指数 n 为1，使得核球成分用e指数函数进行拟合，因此导致 $n_{\mathrm{b,M16}}/n_{\mathrm{b,VAC}}=8$ 附近出现聚集。盘成分与核球成分相比，结果明显不同。从图6 d) 可见，虽然大部分晚型星系的盘成分在两个星表中均是由e指数函数 $(n_\mathrm{d}=1)$ 来拟合的，但部分星系因为MPP-VAC星表限定了Sérsic指数 n 后，核球成分由e指数函数拟合，盘成分由Sérsic指数 $n<1$ 的函数拟合，因此两个星表拟合得到的盘成分Sérsic指数 n_d 的差值 $\Delta\lg n_\mathrm{d}$ 存在偏离0的星系，导致平均弥散为0.14，但与核球成分的弥散相比明显偏小。

图6 e) 展示了两个星表核球成分在半光半径处面亮度 μ_e 的差值 $(\Delta\mu_\mathrm{e})$，颜色表征M16星表的核球成分光度占比。从图6 e) 中可以发现，$\Delta\mu_\mathrm{e}$ 的中位值在0附近，但 $\Delta\mu_\mathrm{e}$ 的平均弥散较大，为3.31 mag·arcsec^{-2}；相比而言，盘成分中心面亮度的差值 $(\Delta\mu_0$，图6 f))的中位值大约在0.5 mag·arcsec^{-2}，表明M16星表得到盘成分中心面亮度相对较暗，而 $\Delta\mu_0$ 的平均弥散为1.09 mag·arcsec^{-2}，明显较小。此外，我们也可以发现，μ_e 拟合结果差别大的星系 (蓝紫色点) 多是M16星表中核球占比较低的星系 $(B/T\approx0)$。

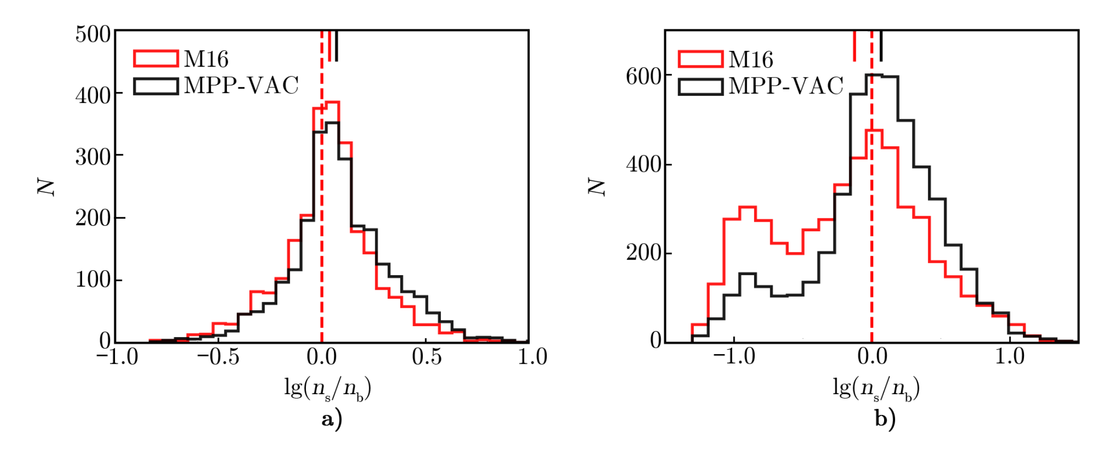
由图6 g) 可知，两个星表拟合得到的核球成分总视星等差值 (Δm_b) 的弥散也较大，Δm_b 的平均弥散为1.73 mag，且M16星表核球Sérsic指数 n_b 较高的星系 (红点) 其星等差异 Δm_b 的弥散也较大；而从图6 h) 可以发现，盘成分总视星等差值 (Δm_d) 的平均弥散仅为0.41 mag，相对较小。

通过以上比较可以看出，与早型星系相反，不同星表给出的晚型星系两成分分解结果差异较大，特别是晚型星系中的核球成分，其径向面密度轮廓的描述参数在不同星表中差别很大，核球和盘成分的半光半径、Sérsic指数、面亮度和视星等的平均弥散比分别为4.9, 3, 3和4，这可能是因为核球成分在晚型星系中一般都比较暗弱。

3.3 单成分与两成分的Sérsic指数一致性的比较

M16和MPP-VAC两个星表对每一个星系都做了单成分拟合和双成分分解，那么仅用一个单成分Sérsic函数是否足以描述星系的径向面亮度轮廓？通过比较单成分的Sérsic指数 n_s 与两成分中核球成分的Sérsic指数 n_b 是否一致，我们可以初步判断单成分拟合是否适合示踪整个星系的结构。

图 7 展示了单成分与两成分中核球成分的 Sérsic 指数 n 的比较。从图 7 a) 的早型星系中可以看出，M16 星表和 MPP-VAC 星表在早型星系中，其单成分 Sérsic 指数 n_s 与核球成分的 Sérsic 指数 n_b 的一致性表现较好，且它们的中位值都在 0 附近，表明在早型星系中，单成分的拟合结果能较好地示踪整个星系的结构。通过分别计算 M16 星表和 MPP-VAC 星表中 $\lg(n_s/n_b)$ >0.3 和 $\lg(n_s/n_b) < -0.3$ 所占的比例 (如表 3 中的早型星系所示) 可以发现，与 M16 星表相比，MPP-VAC 星表的单成分与核球成分的 Sérsic 指数的比值 n_s/n_b 相对略大，这可能是由于部分早型星系因中心像素太亮而被 MPP-VAC 星表压低了 n_b 的取值范围。因此，MPP-VAC 星表核球成分的 Sérsic 指数 n_b 相对较小。



注：a) 是早型星系，b) 是晚型星系。图中红色和黑色直方图分别表示 M16 星表和 MPP-VAC 星表，每幅图顶部的红色和黑色颜色条显示了 M16 和 MPP-VAC 星表的中位值所在位置，红色虚线表示单成分与双成分 Sérsic 指数 n 相一致。

图 7　单成分与双成分的 Sérsic 指数 n 的比较

表 3　M16 和 MPP-VAC 星表单成分和双成分 Sérsic 指数的偏移

	早型星系		晚型星系	
	M16	MPP-VAC	M16	MPP-VAC
$\lg(n_s/n_b)$ >0.3	11%	18%	19%	39%
$\lvert\lg(n_s/n_b)\rvert \leqslant 0.3$	81%	76%	54%	42%
$\lg(n_s/n_b) < -0.3$	8%	6%	27%	19%

从图 7 b) 的晚型星系直方图中可以发现，M16 星表和 MPP-VAC 星表的单成分 Sérsic 指数 n_s 与核球成分的 Sérsic 指数 n_b 一致的星系比早型星系要少很多，$|\lg(n_s/n_b)| \leqslant 0.3$ 的星系仅占约 50%，剩余一半的星系均存在明显差异 (见表 3 中晚型星系)。M16 星表的中位值小于 0，单成分 Sérsic 指数 n_s 比双成分核球 Sérsic 指数 n_b 小的居多，其中 $\lg(n_s/n_b) < -0.3$ 的占 27%；MPP-VAC 星表的中位值略大于 0，n_s 比 n_b 大的居多，其中 $\lg(n_s/n_b)$ >0.3 的占 39% (见表 3)。因此，较多的晚型星系不适合用单一成分示踪整个星系的结构。此外，我们也可以看到该分布存在明显的双峰结构，在 $\lg(n_s/n_b) \approx -0.9$ 处存在第二个峰。这是因

为在双成分分解时，核球成分被用以描述星系中心的高亮结构，并不需要顾及外围的延展结构，因此 Sérsic 指数 $n_{\rm b}$ 在拟合时会为了描述陡峭下降的中心轮廓而靠近所允许的上限 8，导致 $n_{\rm s}/n_{\rm b}$ 出现第二个峰值。由于 MPP-VAC 星表对一些中心亮度过高的星系拟合时压低了 $n_{\rm b}$，因此第二个峰值明显比 M16 星表小，且 $n_{\rm s}/n_{\rm b}$ 的比值总体偏大。

4 基于 M16 和 MPP-VAC 星表成分分解结果的低表面亮度星系选取

4.1 两个星表盘成分中心面亮度的比较

一些特殊研究目标的样本选取是以盘成分的中心面亮度为依据，例如，一般定义 LSBG 为盘成分 g 波段中心面亮度 $\mu_{0,\rm g} > 22.5$ mag·arcsec^{-2} 的星系[15]。因此，盘成分的分解结果将会直接影响 LSBG 的样本选择。在这一节中，我们将根据星表所给出的盘成分拟合参数 Sérsic 指数 $n_{\rm d}$、半光半径 $R_{\rm e,d}$ 和视星等 $m_{\rm d}$ 来推算盘成分的中心面亮度，并详细讨论两个星表盘成分的中心面亮度差异。

当盘成分的径向面亮度轮廓由 Sérsic 函数[18]描述时，可得：

$$I(r) = I_0 \exp\left[-b_{\rm n}\left(\frac{r}{R_{\rm e}}\right)^{1/n_{\rm d}}\right] \quad , \tag{3}$$

其中，I_0 是盘成分的中心面亮度，$R_{\rm e}$ 为星表所给的盘成分的半光半径；$b_{\rm n} = 1.999\,2$, $n_{\rm d} = 0.327\,1$，其中 $n_{\rm d}$ 为星表所给的盘成分 Sérsic 指数。$I(r)$ 对半径积分所得的总光度为：

$$m_{\rm d} = -2.5\lg\int_0^\infty 2\pi r I(r){\rm d}r \quad , \tag{4}$$

其中，$m_{\rm d}$ 为星表所给的盘成分星等。由式 (3) 和 (4) 可求解 I_0，从而得到中心面亮度：

$$\mu_0 = -2.5\lg I_0 \quad . \tag{5}$$

当盘成分是由 e 指数函数进行拟合时，即 Sérsic 指数 $n_{\rm d} = 1$ 的特例，盘的中心面亮度公式可以简写成[22]：

$$\mu_{0,\rm d} = m_{\rm d} + 2.5\lg(2\pi R_{\rm d}^2) \quad , \tag{6}$$

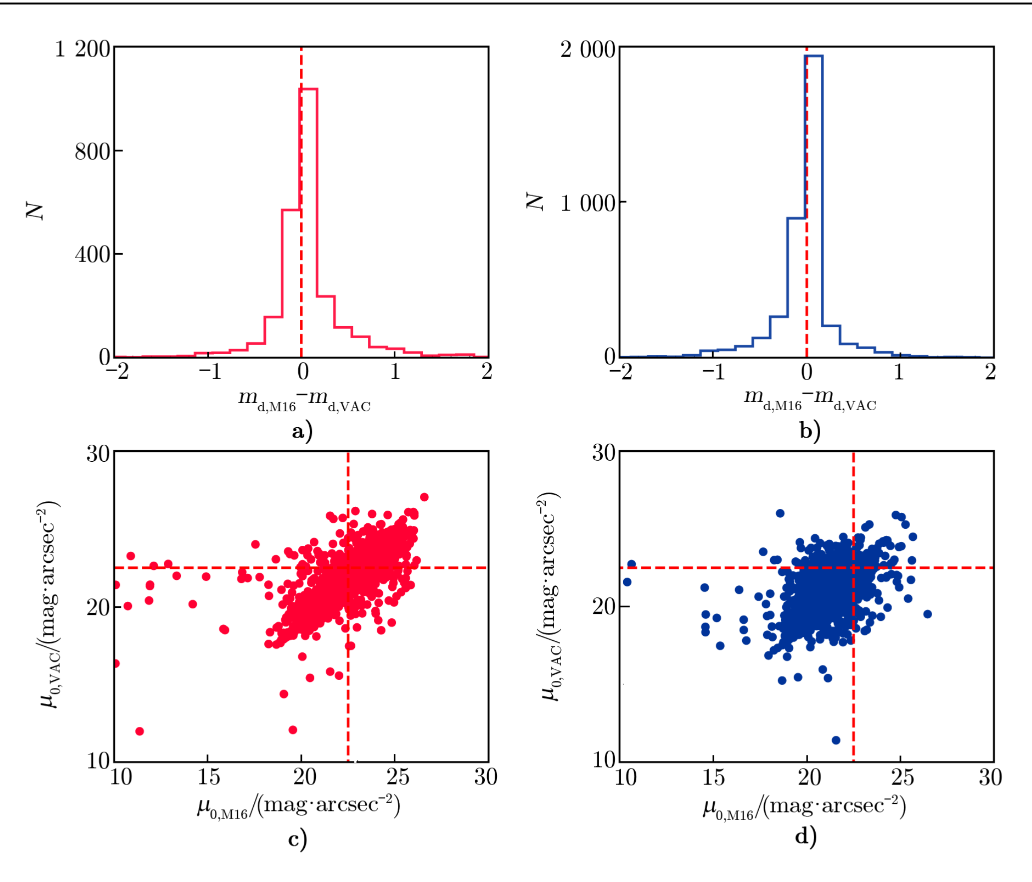
其中，$m_{\rm d}$ 是星系盘成分的视星等；$R_{\rm d}$ 是盘的标长，在 e 指数盘中，$R_{\rm d} = R_{\rm e}/1.678$。

我们假设盘成分是光学薄的，并进行倾角改正。对中心面亮度进行倾角和宇宙昏暗效应改正后，得到盘的中心面亮度为：

$$\mu_{0,\rm cor} = \mu_{0,\rm d} + 2.5\lg(b/a) - 10\lg(1+z) \quad , \tag{7}$$

其中，b/a 是盘成分的半短轴与半长轴之比，z 是星系红移。

两个星表中盘成分视星等差的分布见图 8。从图 8 a), b) 的直方图中可以看出，早、晚型星系中大部分星系盘成分的视星等相一致。在早、晚型星系中，$|m_{\rm d,M16} - m_{\rm d,VAC}| \leqslant$



注：a), c) 是早型星系，b), d) 是晚型星系。a), b) 是两个星表拟合所得的盘成分视星等差值的直方图，c), d) 是两个星表盘成分中心面亮度的比较，红色虚线是盘中心面亮度为 22.5 mag·arcsec^{-2} 所在位置。

图 8　不同形态类型星系的盘成分亮度的比较

0.15 mag 的星系占比分别为 60% 和 68%，视星等差值 $|m_{\rm d,M16} - m_{\rm d,VAC}| > 1$ mag 的早、晚型星系占比分别为 6% 和 3%。

图 8 c), d) 比较了两个星表中早、晚型星系的盘中心面亮度。56% 的早型星系(见图 8 c))中两个星表所得的盘中心面亮度都暗于 22.5 mag·arcsec^{-2}，而 24% 的早型星系两个星表拟合所得的盘中心面亮度都亮于 22.5 mag·arcsec^{-2}；晚型星系 (见图 8 d)) 在两个星表中盘中心面亮度都暗于 22.5 mag·arcsec^{-2} 的星系明显较少，所占比例仅为 3%，而 88% 的晚型星系两个星表拟合所得的盘中心面亮度都亮于 22.5 mag·arcsec^{-2}。因此，晚型星系中两个星表都被选定为 LSB 的星系明显较少，且有 9% 的星系在两个星表中有明显不同的选定结果，具体数目和所占比例如表 4 所示。

4.2　LSBG 星系的判定

在限定了 Sérsic 函数的指数 n 后，MPP-VAC 星表对中心像素过亮而影响成分分解的星系重新进行了拟合，因此拟合结果与 M16 星表有一定的差异，对一些特殊类型星系的分类判断有别。例如，LSBG 一般定义为盘成分 g 波段中心面亮度 $\mu_{0,\rm g} > 22.5$ mag·arcsec^{-2}

表 4 晚型星系中 M16 和 MPP-VAC 星表盘中心面亮度的判定

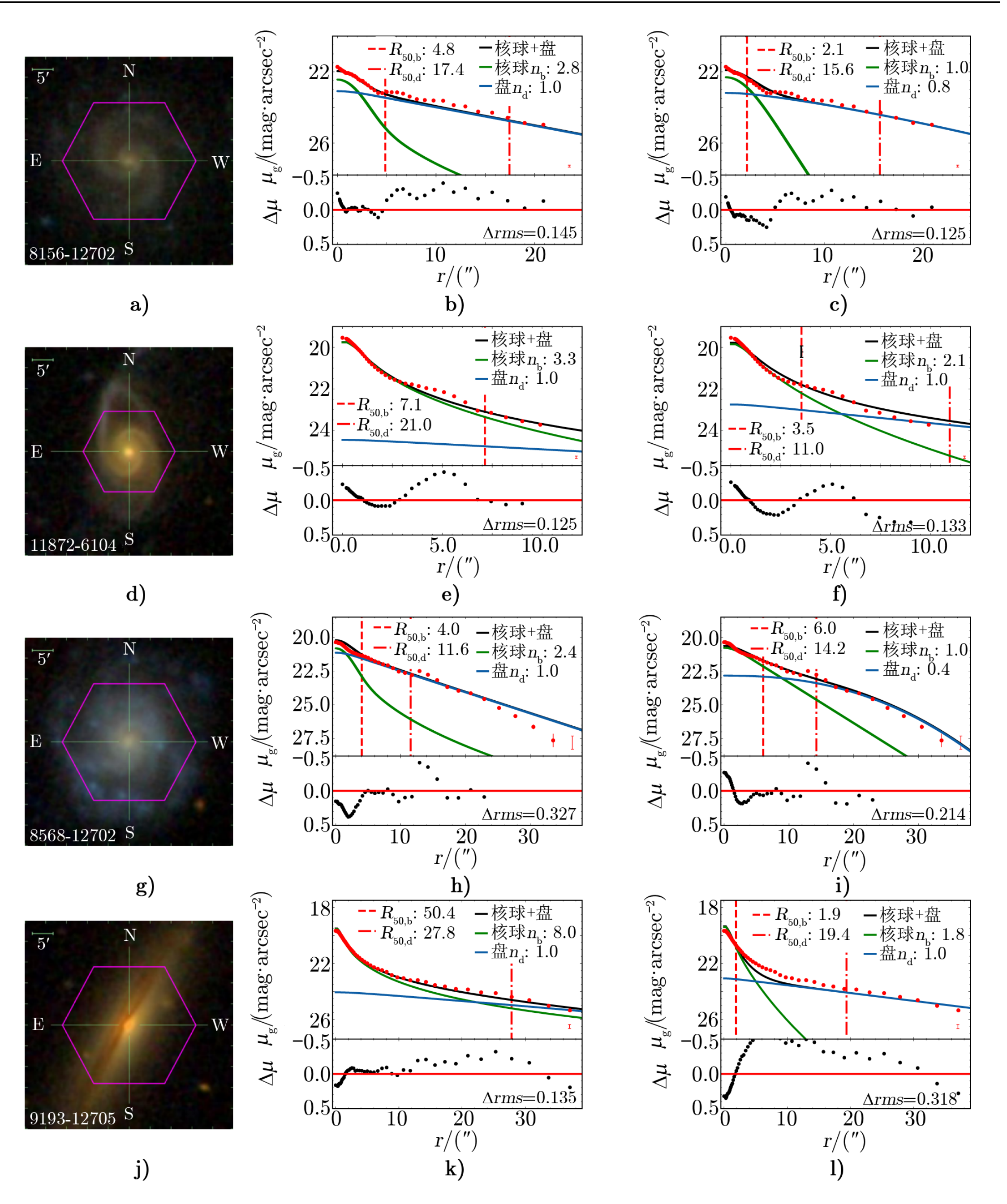
中心面亮度	数目	比例
$\mu_{0,\rm M16}$ <22.5, $\mu_{0,\rm MPP-VAC}$ <22.5	3 446	88%
$\mu_{0,\rm M16}$ <22.5, $\mu_{0,\rm MPP-VAC}$ >22.5	176	5%
$\mu_{0,\rm M16}$ >22.5, $\mu_{0,\rm MPP-VAC}$ <22.5	152	4%
$\mu_{0,\rm M16}$ >22.5, $\mu_{0,\rm MPP-VAC}$ >22.5	115	3%

的星系[15]，而从图 8 d) 中可知，88% 的晚型星系在两个星表中拟合得到的盘中心面亮度都亮于 22.5 mag·arcsec^{-2}，剩下 12% 的晚型星系中，只有 1/4 的星系被共同认定为 LSBG，另有 3/4 的星系具有不同的认定结果。因此，我们将在本节展开讨论使用这两个星表选取 LSBG 样本的区别。

图 9 a), b), c) 是星系 8156-12702 的拟合结果，该星系在两个星表中都被认定为 LSBG ($\mu_{0,\rm d}$ >22.5 mag·arcsec^{-2})。由图 9 a) 可知，这是一个有旋臂结构且结构成分较暗的旋涡星系。在 M16 星表 (见图 9 b)) 中用 $n_{\rm b}$ = 2.8 的核球成分以及一个 e 指数盘来还原星系的整体轮廓，其核球成分所占比例 B/T 较小，为 0.05。在 MPP-VAC 星表 (见图 9 c)) 中该星系的核球成分用 e 指数函数拟合，而盘成分用 $n_{\rm d} < 1$ 的 Sérsic 函数进行拟合，使得核球和盘成分的半光半径都变小。由于星系整体都较暗弱，因此，两个星表得到的盘成分都小于 22.5 mag·arcsec^{-2}。通过计算两个星表的拟合残差 ($\Delta rms = \sqrt{\Sigma(\mu_{\rm data} - \mu_{\rm model})^2/n}$) 发现，MPP-VAC 星表的残差相对较小。

图 9 d), e), f) 展示了星系 11872-6104 的拟合结果，该星系在 M16 星表中被认定为 LSBG ($\mu_{0,\rm d}$ > 22.5 mag·arcsec^{-2})，而在 MPP-VAC 星表中并没有 ($\mu_{0,\rm d}$ < 22.5 mag·arcsec^{-2})。这是由于星系 11872-6104 的核球较亮并且有明显的旋臂结构存在，在 M16 星表中用一个 $n_{\rm b}$ = 3.3 的 Sérsic 核球成分已可重现观测到的星系整体的面亮度轮廓，因此附加了一个面亮度较低 ($\mu_{0,\rm d}$ = 24.5 mag·arcsec^{-2}) 的 e 指数盘 (见图 9 e))，在 M16 星表中其 B/T 的比值为 0.64；而 MPP-VAC 星表则对 Sérsic 指数进行限制，使得核球成分所占比例下降，其 B/T 的比值为 0.38，在 MPP-VAC 星表中用 Sérsic 指数 $n_{\rm b}$ = 2.1，$R_{50,\rm b}$ = 3.5$''$ 的更小的核球成分外加中心面亮度 $\mu_{0,\rm d}$ 更高的盘成分再现了总面亮度轮廓。由于两个星表都只进行了两成分分解，没有考虑旋臂结构成分，从图像上看，两个星表的残差 Δrms 很相似。M16 星表拟合得到核球成分半光半径为 7.1$''$，且核球占比很高，相比而言，MPP-VAC 星表对核球成分 ($R_{50,\rm b}$ = 3.5$''$) 和盘成分 ($R_{50,\rm d}$ = 11$''$) 的基本描述更合理。

图 9 g), h), i) 展示了星系 8568-12702 的拟合结果，与星系 11872-6104 相反，该星系在 MPP-VAC 星表中被认定为 LSBG，而在 M16 星表中并不是。星系 8568-12702 也具有旋臂结构，且星系整体较弥散。M16 星表用一个较小的核球 ($n_{\rm b}$ = 2.4, $R_{50,\rm b}$ = 4.0$''$) 和一个较明亮、延展的 e 指数盘 ($R_{50,\rm d}$ = 11.6$''$) 来拟合，其 B/T 的比值为 0.08；而 MPP-VAC 星表则通过限制 Sérsic 指数进行重新拟合，得到了一个由 e 指数函数描述的稍大核球 ($R_{50,\rm b}$ = 6.0$''$) 和一个中心相对较暗的盘成分，其 B/T 的比值为 0.39。通过比较两个星表拟合的残差发现，该星系在 MPP-VAC 星表中盘成分的拟合结果比 M16 星表更符合真实数据



注：第一行是星系整体较暗弱的旋涡星系，第二行是核球较亮的旋涡星系，第三行是核球较暗的旋涡星系，第四行是侧向星系。第一列是星系的 SDSS 测光图像，第二列是 M16 星表的拟合结果，第三列是 MPP-VAC 星表的拟合结果。红色的点是星系椭圆等光度测光所得的 g 波段面亮度轮廓，绿色和蓝色实线分别是核球和盘的拟合结果，黑色实线是核球和盘成分总面亮度叠加的拟合结果，所有模型线均卷积了 PSF，红色虚线和点划线分别是核球和盘的半光半径，在图例中分别显示了各拟合参数的数值，并在每幅图的右下角显示了真实数据点 (红点) 中最大的测光误差；下图中黑色的点显示了实测面亮度 (红点) 减去总面亮度拟合曲线 (黑线) 的残差 $\Delta\mu_{\rm g}$ 分布，红色实线表征拟合结果与真实数据一致，在右下角显示 Δrms 的值。

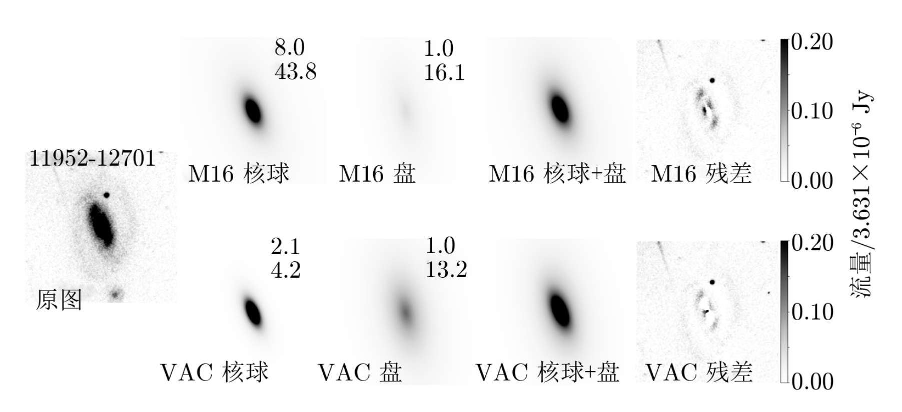
图 9　两个星表盘中心面亮度差异较大的星系拟合结果比较

点，且 MPP-VAC 星表的残差 (Δrms) 相对更小。

我们还发现部分拟合差异较大的星系是侧向星系，如图 9 j), k), l) 所示。侧向星系 9193-12705 有明显的尘埃带，在两个星表中的拟合结果明显不同，M16 星表的核球成分非常大 ($R_{50,\rm b} = 50.4''$)，而 MPP-VAC 星表的盘成分更亮，MPP-VAC 星表拟合结果残差 (Δrms) 相对更大 (见图9l))。但由于侧向星系受尘埃带影响，拟合结果具有较大的不确定性，因此，在选择 LSBG 时建议对侧向星系重新拟合，而非采用星表中成分分解的结果。

在对比 M16 星表与 MPP-VAC 星表时，发现在 M16 星表中有些晚型星系由于受到中心像素的影响，其 Sérsic 指数 n 返回为拟合的上限值 8；而在 MPP-VAC 星表中重新限制 Sérsic 指数 n，使星系具有较暗弱的核球和较延展且相对明亮的盘，正如星系 11952-12701 所示 (见图 2)。从图 2 的一维轮廓中也可以发现两个星表有明显不同的核球和盘面亮度轮廓，M16 星表 e 指数盘的中心面亮度更暗，盘的半光半径更大，而 MPP-VAC 星表的核球为 e 指数轮廓，半光半径更小，盘成分的面亮度在趋于星系中心时变平，面亮度略高。将两个星表拟合结果进行对比后发现，两个星表核球+盘面亮度轮廓与观测数据点的残差 (Δrms) 相似。

依据两个星表给出的拟合参数，我们利用 GALFIT 软件包还原了星系 11952-12701 的二维图像，如图 10 所示。图 10 最左侧为星系 11952-12701 的 SDSS g 波段测光图像，可以看出这是一个核球较亮、盘成分较暗弱的晚型星系。右侧四列分别为利用 GALFIT 还原两个星表拟合所得的核球成分、盘成分、核球+盘及残差的二维图像，第一行对应 M16 星表，而第二行对应 MPP-VAC 星表。与 M16 星表相比，MPP-VAC 星表拟合的核球结构更小更暗，盘成分的亮度明显更亮且略延展；MPP-VAC 星表拟合的残差相对更小，并且其星系盘成分拟合得更好。



注：第一列图是星系 SDSS g 波段的测光图像；第二列图是核球成分的拟合图像，右上角的数值分别表示核球成分的 Sérsic 指数 $n_{\rm b}$ 和半光半径 $R_{50,\rm b}$；第三列图是盘成分的拟合图像，右上角的数值分别表示盘成分的 Sérsic 指数 $n_{\rm d}$ 和半光半径 $R_{50,\rm d}$；第四列图是核球和盘成分总面亮度叠加的拟合图像；第五列图是用原始图像减去总面亮度拟合图像后得到的残差图像，五幅图像都具有相同的颜色棒如最右侧所示。第一行是 M16 星表的还原结果，第二行是 MPP-VAC 星表的还原结果。

图 10　GALFIT 还原两个星表拟合所得的星系 11952-12701 各个成分图像

因此，基于以上比较与分析，我们最终采用 MPP-VAC 星表的 SerExp 两成分拟合结果来筛选 LSBGs。在 MPP-VAC 星表中，排除侧向星系 (星系轴比 $b/a > 0.7$) 后，并选择盘的中心面亮度 $\mu_{0,\mathrm{g}} > 22.5$ mag·arcsec^{-2} 的星系，最终得到 128 个 LSBGs。

5 总结与展望

本文主要介绍了两个星系成分分解星表——M16 星表和 MPP-VAC 星表，并将两个星表进行匹配，得到两个共同样本，即 Sérsic 单成分样本 (7 613 个星系) 和 SerExp 两成分样本 (6 394 个星系)。在详细比较两个星表 g 波段拟合结果后，得到主要结论如下。

(1) 单成分 Sérsic 拟合结果的比较。无论对于早型还是晚型星系，两个星表拟合的视星等、Sérsic 指数和轴比都相似，且不受星系质量影响。两个星表对早型星系的半光半径 R_{50} 的拟合结果差值 $\Delta\lg R_{50}$ 的弥散略大于晚型星系。但总的来说，两个星表单成分拟合参数的结果都接近。

(2) 两成分 SerExp 拟合结果的比较。在早型星系中，大部分星系盘成分都是由 e 指数函数拟合，因此两星表核球成分 Sérsic 指数 n_b 的差值 $\Delta\lg n_\mathrm{b}$ 在两个星表中弥散较大，而盘成分则是半光半径 $\Delta\lg(R_{50,\mathrm{d}})$、中心面亮度 $\Delta\mu_0$ 和视星等 Δm_d 在两个星表中具有略大的差异，核球与盘成分的平均弥散比分别为 0.83, 0.94 和 0.52；比较两个星表的拟合结果发现，当 M16 星表拟合得到的核球成分较大 n_b 时，核球成分 $R_{50,\mathrm{b}}$ 也较大，核球成分的视星等也较亮。晚型星系核球成分的半光半径 $\Delta\lg R_{50,\mathrm{b}}$ 和 Sérsic 指数 $\Delta\lg n_\mathrm{b}$、面亮度值 $\Delta\mu_\mathrm{e}$ 和视星等 Δm_b 的弥散明显大于盘成分，核球与盘成分的平均弥散比分别为 4.9, 3, 3 和 4，表明两个星表对晚型星系中盘成分拟合结果的一致性要显著好于核球成分。

(3) 单成分与两成分 Sérsic 指数一致性的比较。在早型星系中，单成分 Sérsic 指数 n_s 与核球成分的 Sérsic 指数 n_b 的一致性表现较好，80% 的早型星系中单成分的拟合结果能较好地示踪整个星系的结构。约 50% 的晚型星系，其单成分 Sérsic 指数 n_s 和核球成分的 Sérsic 指数 n_b 存在明显差别，因此，晚型星系不适合用单一成分示踪整个星系的结构，且在 $\lg(n_\mathrm{s}/n_\mathrm{b}) \approx -0.9$ 处存在第二个峰，这是由于部分晚型星系的中心有较亮的结构存在。

(4) 两个星表盘成分中心面亮度的比较。对大部分早、晚型星系而言，两个星表拟合得到的盘成分视星等相一致。依据 LSBG 的定义，我们发现，在晚型星系中 LSBG 候选体占 12%，但只有 1/4 的星系被两个星表共同认定为 LSBG，剩余 3/4 的星系仅被一个星表判定为 LSBG。

我们挑选了盘成分中心面亮度在两个星表中拟合结果明显不同的星系，发现拟合结果重现了星系各成分的面亮度轮廓；与观测面亮度进行了比较，发现与 M16 星表相比，MPP-VAC 星表拟合结果的残差相对更小。因此，在去掉侧向星系后，我们采用 MPP-VAC 星表并最终选出 128 个 LSBGs。

参考文献：

[1] Ciambur B C. ASA, 2016, 33: e062
[2] Kormendy J, Kennicutt R C. ARA&A, 2004, 42: 603
[3] Hopkins P F, Bundy K, Croton D, et al. AJ, 2010, 715: 202
[4] Athanassoula E. MNRAS, 2003, 341: 1179
[5] Blanton M R, Kazin E, Muna D, et al. AJ, 2011, 142: 31
[6] Simard L, Mendel J T, Patton D R, et al. ApJS, 2011, 196: 11
[7] Bertin E, Arnouts S. ApJS, 1996, 117: 393
[8] Simard L, Willmer C N A, Vogt N P, et al. ApJS, 2002, 142: 1
[9] Meert A, Vikram V, Bernardi M. MNRAS, 2016, 455: 2440 (M16)
[10] Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. AJ, 2002, 124: 266
[11] Domínguez Sánchez H, Margalef B, Bernardi M, et al. MNRAS, 2021, 10: 1093(MPP-VAC)
[12] Fischer J -L, Domínguez Sánchez H, Bernardi M. MNRAS, 2019, 483: 2057
[13] Kim K, Oh S, Jeong H, et al. ApJS, 2016, 225: 6
[14] Catalán-Torrecilla C, Gil de Paz A, Castillo-Morales A, et al. AJ, 2017, 848: 87
[15] Morshidi-Esslinger Z, Davies J I, and Smith R M. MNRAS, 1999, 304: 297
[16] Impey C, Bothun G. ARA&A, 1997, 35: 267
[17] Fischer J -L, Bernardi M, and Meert A. MNRAS, 2017, 467: 490
[18] Sérsic J L. Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina，1963, 6: 41
[19] de Vaucouleurs G. Annales d'Astrophysique, 1948, 11: 247
[20] Meert A, Vikram V, Bernardi M. MNRAS, 2015, 446: 3943
[21] Brinchmann J, Charlot S, White S D M, et al. MNRAS, 2004, 351: 1151
[22] Zhong G H, Liang Y C, Liu F S, et al. MNRAS, 2008, 391: 986

Comparison of Photometric and Morpholgical Decompositions Catalgues

SHEN Meng-ting[1,2], YIN Jun[2], HAO Lei[2], LU Jia-feng[2], JIANG Qing-quan[1], LI Jing[1]

(1. China West Normal University, Nanchong 637000, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: The decomposition of the surface brightness profile of galaxies is helpful to understand the star formation and evolution history of galaxies. There are several catalgues of the photometric and morpholgical decomposition of galaxies based on large samples in the literature, which are of great significance in the study of the statistical properties of galactic structures. However, due to the difference in individual fitting results, selecting certain special types of galaxies for small samples will lead to large deviations. Therefore, it is necessary to compare and understand the similarities and differences of these catalgues. Based on the galactic decomposition catalgues published by Meert et al. and Domínguez

et al.(2021, MPP-VAC), there are two sub-samples, i.e., Sérsic and Sérsic + Exponential fits, have been matched. After comparing the fitting results of the two catalgues, the main conclusions are as follows: for single-component fits, the apparent magnitude and axis ratio of the two catalgues are relatively consistent. When comparing the two-component fitting results of the two catalgues, it is found that in the early-type galaxies, in addition to the Sérsic index, the consistency of the fitting results of the bulge component is better than that of the disk component, and the average dispersion ratios of the half-light radius, surface brightness and apparent magnitude of the bulge and disk components are 0.83, 0.94 and 0.52, respectively; However, in late-type galaxies, the consistency of the fitting results of the disk component is significantly better than that of the bulge component, and the average dispersion ratios of the half-light radius, Sérsic index, surface brightness, and apparent magnitude of the bulge and disk components are 4.9, 3, 3 and 4 respectively. The main reason for this difference in the two-component fitting results of the two catalgues is that the MPP-VAC catalgue set an upper limit on the Sérsic n if the innermost pixels is too bright and affects the fitting results, making the decomposition results more reasonable. According to the definition of low surface brightness galaxies (LSBGs), 12% of the late-type galaxies are identified as LSBGs candidates, of which only 1/4 of the galaxies were identified as LSBGs by both two catalgues, and due to differences in individual fitting results, the remaining 3/4 of the candidates are identified as LSBGs by only one catalgue.

Key words: galaxy structure; photometric decomposition; structure parameters